



**Europäisches  
Patentamt**

**European  
Patent Office**

**Office européen  
des brevets**

REC'D 12 JUL 2004

WIPO PCT

**Bescheinigung**

**Certificate**

**Attestation**

Die angehefteten Unterla-  
gen stimmen mit der  
ursprünglich eingereichten  
Fassung der auf dem näch-  
sten Blatt bezeichneten  
europäischen Patentanmel-  
dung überein.

The attached documents  
are exact copies of the  
European patent application  
described on the following  
page, as originally filed.

Les documents fixés à  
cette attestation sont  
conformes à la version  
initialement déposée de  
la demande de brevet  
européen spécifiée à la  
page suivante.

**Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°**

03405519.4

**PRIORITY**

**DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Der Präsident des Europäischen Patentamts;  
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets  
p.o.

R C van Dijk



Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets

Anmeldung Nr:  
Application no.: 03405519.4  
Demande no:

Anmeldetag:  
Date of filing: 10.07.03  
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

ABB RESEARCH LTD.  
Affolternstrasse 52  
8050 Zürich  
SUISSE

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:  
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.  
If no title is shown please refer to the description.  
Si aucun titre n'est indiqué se référer à la description.)

Verfahren und Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einem selbstbetätigten  
Strombegrenzer

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)  
revendiquée(s)

Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/  
Classification internationale des brevets:

H01H/

Am Anmeldetag benannte Vertragsstaaten/Contracting states designated at date of  
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LU MC NL  
PT RO SE SI SK TR LI

## BESCHREIBUNG

Verfahren und Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einem selbstbetätigten Strombegrenzer

## TECHNISCHES GEBIET

Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Primärtechnik für elektrische Schaltanlagen, insbesondere der Begrenzung von Fehlerströmen in Hoch-, Mittel- oder Niederspannungsschaltanlagen. Sie geht aus von einem Verfahren und einer Vorrichtung zur Strombegrenzung sowie von einer Schaltanlage mit einer solchen Vorrichtung gemäss Oberbegriff der unabhängigen Patentansprüche.

## STAND DER TECHNIK

In der DE 40 12 385 A1 wird eine stromgesteuerte Abschaltvorrichtung offenbart, deren Funktionsprinzip auf dem Pinch-Effekt mit Flüssigmetall beruht. Zwischen zwei Festmetallelektroden ist ein einzelner, schmaler, mit Flüssigmetall gefüllter Kanal angeordnet. Bei Überstrom wird der flüssige Leiter infolge der elektromagnetischen Kraft durch Pinch-Effekt zusammengezogen, so dass der Strom selbst den flüssigen Leiter abschnürt und trennt. Das verdrängte Flüssigmetall wird in einem Vorratsbehälter gesammelt und fliesst nach dem Überstromereignis wieder zurück. Die Kontakttrennung erfolgt ohne Lichtbogen. Jedoch ist die Einrichtung nur für relativ kleine Ströme, geringe Spannungen und langsame Abschaltzeiten geeignet und bietet keinen dauerhaften Ausschaltzustand.

In der DE 26 52 506 wird ein elektrischer Hochstromschalter mit Flüssigmetall offenbart. Einerseits wird eine Flüssigmetallmischung zur Benetzung von Festmetallelektroden und zur Herabsetzung des Kontaktwiderstands verwendet. Dabei wird das Flüssigmetall durch mechanische Verdrän-

gung, z. B. durch bewegliche Kontakte oder pneumatisch angetriebene Tauchkolben, entgegen der Schwerkraft in den Kontaktpalt getrieben. Durch Pinch-Effekt, gemäss dem ein stromführender Leiter durch den ihn durchfliessenden Strom eine radiale Striktion erfährt, kann das Flüssigmetall zusätzlich im Kontaktpalt stabilisiert und festgehalten werden. Äussere Magnetfelder und magnetische Streuflüsse, z. B. durch die Stromzuführungen, können im Flüssigmetall Strömungsinstabilitäten verursachen und werden abgeschirmt und gegebenenfalls beim Ausschalten zugelassen, um das Löschen des Lichtbogens im Flüssigmetall zu unterstützen. Nachteilig ist, dass eine graduelle Strombegrenzung nicht möglich ist und Lichtbogen zwischen den Festelektroden Oxidation im Flüssigmetall verursachen. Die Konstruktion des Hochstromschalters umfasst Dichtungen für Flüssigmetall, inertes Gas oder Vakuum und ist entsprechend aufwendig.

In der DE 199 03 939 A1 wird eine selbsterholende Strombegrenzungseinrichtung mit Flüssigmetall offenbart. Zwischen zwei Festmetallelektroden ist ein druckfestes Isoliergehäuse angeordnet, in dem Flüssigmetall in Verdichterräumen und in dazwischenliegenden, die Verdichterräume verbindenden Verbindungskanälen angeordnet ist, so dass ein Strompfad für Nominalströme zwischen den Festelektroden gegeben ist. In den Verbindungskanälen ist der Strompfad gegenüber den Verdichterräumen eingeengt. Die Verbindungskanäle werden bei Kurzschlussströmen stark erhitzt und scheiden ein Gas aus. Durch lawinenartige Gasblasenbildung in den Verbindungskanälen verdampft das Flüssigmetall in die Verdichterräume, so dass in den nun flüssigmetallentleerten Verbindungskanälen ein strombegrenzender Lichtbogen gezündet wird. Nach Abklingen des Überstroms kann das Flüssigmetall wieder kondensieren und der Strompfad ist wieder betriebsbereit.

In der WO 00/77811 ist eine Fortbildung der selbsterholenden Strombegrenzungseinrichtung offenbart. Die Verbindungskanäle sind nach oben konisch verbreitert, so dass

die Füllstandshöhe des Flüssigmetalls variiert und die Nennstromtragfähigkeit über einen grossen Bereich verändert werden kann. Ausserdem wird durch eine versetzte Anordnung der Verbindungskanäle ein mäanderförmiger Strompfad gebildet, so dass bei überstrombedingtem Verdampfen des Flüssigmetalls eine Serie strombegrenzender Lichtbögen gezündet wird. Derartige Pinch-Effekt Strombegrenzer benötigen einen hinsichtlich Druck und Temperatur sehr stabilen Aufbau, was konstruktiv aufwendig ist. Durch die Strombegrenzung per Lichtbogen tritt grosser Verschleiss im Innern des Strombegrenzers auf und Abbrandrückstände können das Flüssigmetall kontaminieren. Durch die Rekondensation des Flüssigmetalls stellt sich unmittelbar nach einem Kurzschluss wieder ein leitfähiger Zustand ein, so dass kein Ausschaltzustand vorhanden ist.

#### DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren, eine Vorrichtung und eine elektrische Schaltanlage mit einer solchen Vorrichtung zur verbesserten und vereinfachten Strombegrenzung anzugeben. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst.

In einem ersten Aspekt besteht die Erfindung in einem Verfahren zur Strombegrenzung mit einer Strombegrenzungsvorrichtung, die feststehende Elektroden und mindestens eine bewegliche Elektrode umfasst, wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehenden Elektroden ein Betriebsstrom auf einem ersten Strompfad durch die Strombegrenzungsvorrichtung geführt wird und der erste Strompfad zumindest teilweise durch die in einer ersten Position befindliche bewegliche Elektrode geführt wird, wobei in einem zweiten Betriebszustand die mindestens eine bewegliche Elektrode selbsttätig durch eine elektromagnetische Wechselwirkung mit dem zu begrenzenden Überstrom entlang einer Bewegungsrichtung in mindestens eine zweite Position



bewegt wird und die bewegliche Elektrode in der mindestens einen zweiten Position in Serie mit einem Widerstandselement liegt und dadurch ein strombegrenzender zweiter Strompfad durch die Strombegrenzungsvorrichtung gebildet wird, der einen vorgebbaren elektrischen Widerstand aufweist. Erfindungsgemäss löst der Überstrom selber die Strombegrenzung aus. Als zugrundeliegende elektromagnetische Wechselwirkung kommt z. B. die Lorenzkraft auf einen stromführenden Leiter in einem Magnetfeld in Frage, aber auch eine kapazitive, induktive, elektrostatische oder anderweitig elektromagnetische Einwirkung des Überstroms auf den beweglichen Leiterabschnitt oder die bewegliche Elektrode sind denkbar. Da von der beweglichen Elektrode im Strombegrenzungsfall kein Isolator, sondern ein elektrischer Widerstand kontaktiert wird, wird kein Lichtbogen gezündet. Daher kann das Strombegrenzungsverfahren auch bei sehr hohen Spannungsniveaus eingesetzt werden. Zudem tritt kaum Verschleiss durch Abbrand oder durch Korrosion der beweglichen Elektrode auf. Die Strombegrenzung erfolgt reversibel und ist daher wartungsfreundlich und kostengünstig.

In einem ersten Ausführungsbeispiel wird bei einem Übergang von der ersten Position zur zweiten Position, insbesondere zu einer extremalen zweiten Position, die bewegliche Elektrode entlang des Widerstandselements geführt und das Widerstandselement weist einen entlang der Bewegungsrichtung der beweglichen Elektrode ansteigenden elektrischen Widerstand für den zweiten Strompfad auf. Insbesondere ist das Widerstandselement ohmsch und steigt der elektrische Widerstand kontinuierlich mit der zweiten Position an. Auf diese Weise wird eine sanfte Strombegrenzungscharakteristik für eine progressive Strombegrenzung realisiert.

Das Ausführungsbeispiel gemäss Anspruch 3 hat den Vorteil, dass das Magnetfeld unmittelbar auf die stromdurchflossene bewegliche Elektrode einwirkt und diese durch die Lorenzkraft in Bewegung setzt. Die Lorenzkraft ist proportional

zum Produkt aus Magnetfeldstärke und Strom. Das Magnetfeld kann extern, insbesondere konstant oder schaltbar, oder intern, insbesondere durch den zu begrenzenden Strom, erzeugt sein. Durch Ausbalancieren der Lorenzkraft und einer geeigneten Rückstellkraft kann die resultierende Bewegung an den zu begrenzenden Überstrom und an die für den benötigten elektrischen Widerstand erforderliche Elektrodenauslenkung angepasst werden.

Ansprüche 4 und 6 geben besonders einfache Konfigurationen für einen selbsttätigen strombegrenzenden Schalter oder Strombegrenzer mit integriertem Schalter an.

Anspruch 5 gibt Dimensionierungskriterien zur optimalen Auslegung der Dynamik des Strombegrenzungsvorgangs an.

Anspruch 7 und 8 geben vorteilhafte Ausführungsbeispiele mit einem Flüssigmetall und/oder einem Schleifkontakt-Festkörperleiter als bewegliche Elektrode an. Insbesondere können durch eine Serieschaltung von Flüssigmetallsäulen abwechselnd mit einem Dielektrikum auch hohe Spannungen und hohe Ströme effizient und sicher gehandhabt werden.

In einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Strombegrenzung, insbesondere zur Ausführung des Verfahrens, umfassend feststehende Elektroden und mindestens eine bewegliche Elektrode, wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehenden Elektroden ein erster Strompfad für einen Betriebsstrom durch die Strombegrenzungsvorrichtung vorhanden ist und der erste Strompfad zumindest teilweise durch die in einer ersten Position befindliche bewegliche Elektrode führt, wobei elektromagnetische Antriebsmittel zum bei Überstrom selbstbetätigten Bewegen der beweglichen Elektrode entlang einer Bewegungsrichtung in mindestens eine zweite Position vorhanden sind, elektrische Widerstandsmittel mit einem vorgebbaren elektrischen Widerstand vorhanden sind und in einem zweiten Betriebszustand die bewegliche Elektrode zumindest teilweise in Serie zu den Widerstandsmitteln liegt und zusammen mit diesen einen zweiten Strompfad bildet,

auf dem der Betriebsstrom auf einen zu begrenzenden Strom begrenzbare ist.

Weitere Ausführungen, Vorteile und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus abhängigen Ansprüchen sowie aus der nun folgenden Beschreibung und den Figuren.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

- Fig. 1a, 1b zeigen eine erfindungsgemäss selbstbetätigte Strombegrenzungseinrichtung mit Flüssigmetall bei Nennstrombetrieb und im Strombegrenzungsfall;
- Fig. 2, 3 zeigen zwei erfindungsgemäss selbstbetätigte Strombegrenzungseinrichtungen mit mechanischem Schleifkontakt im Nennstrombetrieb (strichpunktiert) und im Strombegrenzungsfall;
- Fig. 4 zeigt einen strombegrenzenden Schalter in Form einer Serieanordnung von Flüssigmetall-oder Schleifkontakt-Strombegrenzer und Schalter;
- Fig. 5 zeigt einen strombegrenzenden Schalter mit Einfangmechanismus für Flüssigmetall bei Nennstrombetrieb;
- Fig. 6 zeigt eine Kurvendarstellung der Variation des Widerstands des Strombegrenzers als Funktion der Position der Flüssigmetallsäule; und
- Fig. 7 zeigt einen kombinierten Flüssigmetall-Strombegrenzer und Flüssigmetall-Leistungsschalter mit externem Magnetfeldantrieb für das Flüssigmetall.

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

#### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Fig. 1a, 1b zeigen ein Ausführungsbeispiel eines Flüssigmetall-Strombegrenzers 1. Der Strombegrenzer 1 umfasst



Festmetall-Elektroden 2a, 2b und Zwischenelektroden 2c für eine Stromzuführung 20 und einen Behälter 4 für das Flüssigmetall 3. Der Behälter 4 hat einen Boden 6 und Deckel 6 aus Isolatormaterial, zwischen denen ein elektrisches Widerstandsmittel 5 mit mindestens einem Kanal 3a für das Flüssigmetall 3 angeordnet ist. Über der Flüssigmetallsäule 3 kann beispielsweise ein Schutzgas, eine Isolierflüssigkeit (mit hier nicht dargestelltem Ausweichvolumen) oder Vakuum angeordnet sein.

Erfindungsgemäss wird das Flüssigmetall 3 oder allgemein eine bewegliche Elektrode 3, 3' durch eine selbsttätige, elektromagnetisch Wechselwirkung mit dem zu begrenzenden Überstrom  $I_2$  in Bewegung versetzt. Im Falle des Flüssigmetalls 3 verbleibt dieses im flüssigen Aggregatzustand und wird durch die erzwungene Bewegung gezielt zwischen den unterschiedlichen Positionen  $x_1$ ,  $x_{12}$  oder  $x_2$  bewegt. Der Pinch-Effekt wird dabei nicht genutzt. Sehr schnelle Strombegrenzungs-Reaktionszeiten von bis zu unter 1 ms sind erzielbar.

Bevorzugt wird der zweite Betriebszustand durch den Überstrom  $I_2$  selbsttätig aktiviert, indem die stromdurchflossene bewegliche Elektrode 3, 3' durch eine elektromagnetische Kraft  $F_{\text{mag}}$  bewegt wird, die senkrecht zum Strom  $I_2$  durch die bewegliche Elektrode 3, 3' und senkrecht zu einem Magnetfeld  $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$  steht und die eine Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung  $x$ , 1 aufweist, wobei das Magnetfeld  $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$  als ein externes Magnetfeld  $B_{\text{ext}}$  und/oder als ein internes, von einer Stromzuführung 2a, 2b; 20 zur Strombegrenzungsvorrichtung 1 erzeugtes Magnetfeld  $B_{\text{int}}$  gewählt wird. Alternativ zur Lorenzkraft kann auch eine andere selbsttätige elektromagnetische Wechselwirkung mit dem Überstrom  $I_2$ , z. B. eine kapazitive, induktive, elektrostatische oder anderweitige Wechselwirkung, zur Strombegrenzung verwendet werden. Dabei bedeutet selbsttätig, dass ohne aktive Strommessung und ohne aktive Regelungstechnik die Bewegung der beweglichen Elektrode ausgelöst und kontrolliert wird.

In einem ersten Betriebszustand (Fig. 1a) fließt ein Betriebs- oder Nennstrom  $I_1$  auf einem ersten oder Nennstrompfad 30 von der Eingangselektrode 2a via Flüssigmetall 3 und gegebenenfalls Zwischenelektroden 2c zur Abgangselektrode 2b. Dabei befindet sich das Flüssigmetall 3 in der ersten Position  $x_1$ , benetzt zumindest teilweise die feststehenden Elektroden 2a, 2b, 2c und überbrückt elektrisch leitend die Kanäle 3a. In einem zweiten Betriebszustand (Fig. 1b) wird das Flüssigmetall 3 entlang der Bewegungsrichtung x, gegeben durch eine Höhererstreckung der Kanäle 3a, in eine zweite Position  $x_2$  bewegt, liegt dort in Serie zu dem elektrischen Widerstandsmittel 5 und bildet mit diesem einen zweiten Strompfad oder Strombegrenzungspfad 31 für einen zu begrenzenden Strom  $I_2$ . Für eine besonders kompakte Anordnung sind der Nennstrompfad 30 und der strombegrenzende zweite Strompfad 31 zueinander parallel und beide senkrecht zu der Höhererstreckung der Kanäle 3a auf einer variablen, durch die zweite Position  $x_2$ ,  $x_2$  des Flüssigmetalls 3 vorgebbaren Höhe angeordnet.

Bevorzugt umfasst das Widerstandsmittel 5 eine dielektrische Matrix 5, die wandartige Stege 5a zur dielektrischen Trennung einer Mehrzahl von Kanälen 3a für das Flüssigmetall 3 aufweist, wobei die Stege 5a ein dielektrisches Material mit in der Bewegungsrichtung x zunehmendem Widerstand  $R_x$  aufweisen. Die Stege 5a stellen somit Einzelwiderstände 5a des Widerstandselements 5 dar mit einem entlang der Kanalhöhe zunehmendem elektrischen Widerstand  $R_x$ . Auf Höhe der ersten Position  $x_1$  des Flüssigmetalls 3 sollen die Stege 5a Zwischenelektroden 2c zur elektrisch leitenden Verbindung der Kanäle 3a aufweisen. Die Kanäle 3a sind vorzugsweise zueinander im wesentlichen parallel angeordnet. Somit wird der strombegrenzende zweite Strompfad 31 gebildet durch eine alternierende Serieschaltung von mit Flüssigmetall 3 gefüllten Kanalbereichen 3a und den Stegen 5a, die als mit ihrer Länge progressive Einzelwiderstände 5a des Widerstandselements 5 wirken.

Fig. 2 und 3 zeigen Ausführungsbeispiele, bei denen die bewegliche Elektrode 3, 3' einen Festkörperleiter 3' mit mindestens einem Schleifkontakt 2d umfasst und im ersten Betriebszustand mit den feststehenden Elektroden 2a, 2b und im zweiten Betriebszustand mindestens einseitig mit dem Widerstandselement 5 elektrisch verbunden wird. Mit Vorteil ist der Festkörperleiter 3' im wesentlichen aus Leichtmetall und/oder in Leichtbauweise, beispielsweise aus metallbeschichtetem Kork, gefertigt und/oder ist der Schleifkontakt 2d zur Reibungsverminderung mit Flüssigmetall benetzt. Fig. 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel, bei dem der Festkörperleiter 3' an einem Ende drehbar mit der Eingangselektrode 2a verbunden ist und am anderen Ende mit dem Schleifkontakt gleitfähig entlang eines kreisbogenförmigen Widerstandselements 5 bewegbar ist. Fig. 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel, bei dem der Festkörperleiter 3, 3' an beiden Ende Schleifkontakte 2d aufweist und zwischen wandartigen Widerständen 5a des Widerstandsmittels 5 wie ein Schwebebalken auf seiner ganzen Länge durch die elektromagnetische Wechselwirkung gegen eine Rückstellkraft  $F_r$ , insbesondere gegen die Schwerkraft, angehoben werden kann. Die Wegpositionen  $l_1$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$  des Schleifkontakts 2d entsprechen den zuvor genannten zweiten Positionen  $x_1$ ,  $x_{12}$ ,  $x_2$  der Flüssigmetallsäule 3. Die extremale zweite Position  $l_{12}$  kann in dem Bereich liegen, wo das Widerstandsmittel 5 in einen Isolator 8 übergeht, so dass eine Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung vorhanden ist.

Bei einem Übergang von der ersten Position  $x_1$ ,  $l_1$  zur zweiten Position  $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$ , insbesondere zu einer extremalen zweiten Position  $x_2$ ,  $l_2$ , wird das Flüssigmetall 3 oder der Festkörperleiter 3' mit Schleifkontakt 2d entlang des Widerstandselements 5 geführt. Zur Erzielung einer sanften Strombegrenzungs- oder Abschaltcharakteristik weist das Widerstandselement 5 einen entlang der Bewegungsrichtung  $x$ ,  $l$  der beweglichen Elektrode 3, 3' ansteigenden elektrischen Widerstand  $R_x$ ,  $R_l$  für den zweiten Strompfad 31 auf. Das Widerstandselement 5 soll einen

ohmschen Anteil aufweisen und ist bevorzugt rein ohmsch mit einem elektrischen Widerstand  $R_x$ ,  $R_1$ , der kontinuierlich mit der zweiten Position  $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$  ansteigt. Für eine lichtbogenfreie Kommutation des Stroms  $i(t)$  von den feststehenden Elektroden 2a, 2b, 2c zum Widerstandselement 5 soll eine typische, vom Kontaktmaterial abhängige, minimale Lichtbogenzündspannung von 10 V - 20 V nicht überschritten werden.

Fig. 4 zeigt den erfindungsgemässen Strombegrenzer 1 in Serie geschaltet mit einem elektrischen Schalter 7, insbesondere einem Leistungsschalter 7. In dieser Anordnung wird ein strombegrenzender Schalter 1, 7 realisiert, bei dem die Strombegrenzung vorgängig durch das erfindungsgemässe Verfahren mit der beweglichen Elektrode 3, 3' und danach eine Stromabschaltung konventionell erfolgt. Es können auch zwei Strombegrenzer 1 mit gegenphasig wirk-samer Auslösung der Elektrodenbewegung hintereinander geschaltet sein, um in jeder Stromhalb-welle eine Strombe-grenzung und gegebenenfalls Stromabschaltung zu erreichen.

Fig. 5 zeigt eine Variante des Strombegrenzers 1, bei welcher ein Einfangbehälter 3b zur Aufnahme des Flüssigmetalls 3 und zur Schaffung einer Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung vorhanden ist. Zudem kann, wie dargestellt, eine Zuführung 3c für Flüssigmetall 3 zum Auffüllen des Flüssigmetalls 3 in den Kanälen 3a und zum Wiederanschalten der Vorrichtung 1 vorhanden sein. Zudem kann zusätzlich zum Nennstrompfad 30 und zum Strombegrenzungspfad 31 eine Isolationsstrecke 32 vorgesehen sein, auf welcher die Stege 5a zur Strombegrenzung in Stege 8a zur Stromisolation übergehen. Die Isolationsstege 8a bestehen im wesentlichen aus Isolationsmaterial, sind vorzugsweise im Bereich des Einfangbehälters 3c angeordnet und bilden zusammen mit den durch das eingefangene Flüssigmetall 3 entleerten Kanälen die Isolationsstrecke 32. Hierbei ist also das Flüssigmetall 3 zwischen dem Nennstrompfad 30, dem Strombegrenzungspfad 31 und der Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung bewegbar, so dass ein



integrierter strombegrenzender Schalter 1 auf Flüssigmetallbasis realisiert ist. Vorteilhaft sind der erste Strompfad 30 für Betriebsstrom  $I_1$ , der zweite Strompfad 31 zur Strombegrenzung und insbesondere die Isolationsstrecke 32 im wesentlichen senkrecht zur Bewegungsrichtung  $x$  und/oder im wesentlichen parallel zueinander angeordnet. Dies ergibt eine besonders einfache Konfiguration für einen integrierten Strombegrenzer - Leistungsschalter 1, der ausschliesslich mit Flüssigmetall 3 arbeitet.

Fig. 6 zeigt für den Strombegrenzer 1 oder strombegrenzenden Schalter 1 eine Dimensionierung des elektrischen Widerstands  $R_x$ ,  $R_1$  als Funktion der zweiten Position  $x_{12}$ ,  $l_{12}$  der beweglichen Elektrode 3, 3'. Mit Vorteil wird der Widerstand  $R_x$ ,  $R_1$  bis zu einer extremalen zweiten Position  $x_2$ ,  $l_2$  auf einen Maximalwert  $R_x(x_2)$ ,  $R_1(l_2)$  ansteigend gewählt. Auch soll für ein gegebenes Spannungsniveau der Maximalwert  $R_x(x_2)$ ,  $R_1(l_2)$  des elektrischen Widerstands  $R_x$ ,  $R_1$  nach Massgabe eines zu begrenzenden Stroms  $I_2$  auf einen endlichen Wert oder zur Abschaltung des Betriebsstroms  $I_1$  auf einen dielektrischen Isolationswert bemessen werden.

Der elektrische Widerstand  $R_x$ ,  $R_1$  als Funktion  $R_x(x_{12})$ ,  $R_1(l_{12})$  der zweiten Position  $x_{12}$ ,  $l_{12}$  sowie eine Weg-Zeit Charakteristik  $x_{12}(t)$ ,  $l_{12}(t)$  der beweglichen Elektrode 3, 3' entlang der Bewegungsrichtung  $x$ ,  $l$  sollen so gewählt werden, dass in jeder zweiten Position  $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$  der beweglichen Elektrode 3, 3' das Produkt aus elektrischem Widerstand  $R_x$ ,  $R_1$  und Strom  $I_2$  kleiner als eine Lichtbogenzündspannung  $U_b$  zwischen der beweglichen Elektrode 3, 3' und den feststehenden Elektroden 2a, 2b und gegebenenfalls Zwischenelektroden 2c ist und/oder dass eine hinreichende Steilheit der Strombegrenzung zur Beherrschung netzbedingter Kurzschlussströme  $i(t)$  erzielt wird.

In allen zuvor genannten Ausführungsbeispielen umfassen die elektromagnetischen Antriebsmittel 2a, 2b, 20; 11;  $B_{int}$ ,  $B_{ext}$  Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20; 11 zur Erzeugung des



Magnetfeldes  $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$ , welches auf die von dem Strom  $I_1$ ,  $I_2$  durchflossene bewegliche Elektrode 3, 3' eine Lorenzkraft  $F_{\text{mag}}$  mit einer Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung  $x$ , 1 ausübt, so dass die bewegliche Elektrode 3, 3' zwischen dem ersten Strompfad 30 für Betriebsstrom  $I_1$ , dem zweiten Strompfad 31 zur Strombegrenzung und insbesondere einer Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung bewegbar ist. Die Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20; 11 können die Stromzuführung 2a, 2b; 20 zur Strombegrenzungsvorrichtung 1 umfassen, um ein internes, vom zu begrenzenden Überstrom  $I_2$  abhängiges Magnetfeld  $B_{\text{int}}$  zu erzeugen.

Im Zusammenhang mit Fig. 6 wird beispielhaft die Dimensionierung eines Flüssigmetall-Strombegrenzers 1 diskutiert. Zur Beherrschung von Kurzschlüssen ist ein von Stromnetz-Parametern und dem Durchbruchverhalten der zu trennenden Kontakte 2a, 2b abhängiger Widerstand  $R_x$  der Strombegrenzung notwendig. Je grösser die Steilheit des Kurzschlussstroms  $i(t)$  ist, um so niedriger muss  $R_x$  gewählt werden. Im ungünstigsten Fall sind die maximale Kurzschlussstrom-Amplitude und die maximale Kurzschlussstrom-Induktivität anzunehmen. Dann gilt:

$$R_x(t) \cdot i(t) < U_b(t) \quad (G1)$$

$$R_x(t) \cdot i(t) + L \cdot di/dt(t) = U_N(t) \quad (G2)$$

wobei  $t$ =Zeitvariable,  $L$ =Netzinduktivität im Kurzschlussfall,  $U_N$ =Betriebs- oder Netzspannung,  $d/dt$  gleich erste und  $d^2/dt^2$  gleich zweite Zeitableitung. In Gleichung (G2) wurde angenommen, dass der Widerstand im Netz  $R_{\text{Netz}} \ll L$  ist und die Netzspannung  $U_N$  bei Kurzschluss aufrechterhalten wird. Ferner gilt die Bewegungsgleichung (G3) für das Flüssigmetall 3 mit der Masse  $m$ , der Position oder Auslenkung  $x_{12}(t)$ , dem Reibungskoeffizienten  $\alpha$  und der antreibenden Kraft  $F$

$$m \cdot d^2 x_{12}/dt^2 + \alpha \cdot dx_{12}/dt(t) = F - F_r, \quad (G3)$$

wobei  $F_r$ =Rückstellkraft, insbesondere  $F_r = F_g + F_{\text{cap}}$  mit  $F_g = m \cdot g$  gleich Gravitationskraft, wobei  $m$ =Masse des Flüssigmetalls 3 und  $g$ =Erdbeschleunigung, und  $F_{\text{cap}}$  gleich Kapillarkraft.

In Fig. 6 wurde beispielhaft eine elektromagnetische Lorenzkraft  $F=F_{\text{mag}}$  angenommen, die durch Selbstwechselwirkung des zu begrenzenden Stroms  $i(t)$  auf das Flüssigmetall 3 ausgeübt wird. Dann gilt zusätzlich

$$F = k \cdot i^2(t) \quad (\text{G4})$$

mit  $k$ =geometrieabhängige Proportionalitätskonstante. Bei externem Magnetfeld  $B$  gilt  $F = k' \cdot i(t)$  mit  $k'$ =weitere Proportionalitätskonstante. Im Detail hängen  $k$  und  $k'$  von der Geometrie des Strombegrenzers 1, insbesondere der Struktur und Anordnung des Widerstandselements 5 sowie der Strompfade 30, 31 und gegebenenfalls 32, ab und von der Anordnung der Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20.

In Fig. 6 wurden beispielhaft angenommen: eine kurzschlussbedingte Stromsteilheit  $di/dt=15$  kA/ms,  $U_N=1$  kV,  $I_1=1$  kA, maximaler Kurzschlussstrom  $I_2=50$  kA sowie plausible Parameterwerte für  $k$ ,  $m$  und  $\alpha$ . Dann ergeben sich durch Lösen der Gleichungen (G2)-(G4) unter der Randbedingung (G1) der Widerstand  $R_x(t)$  und die Weg-Zeitcharakteristik  $x_{12}(t)$  des Flüssigmetalls 3 und schliesslich durch Elimination der Zeitabhängigkeit der Widerstand  $R_x(x_{12})$  als Funktion der zweiten Position  $x_{12}$ , wie in Fig. 6 logarithmisch dargestellt. Ausgehend von der ersten Position  $x_1$ , d. h. bei Ablösung des Flüssigmetalls 3 von den Festelektroden 2a, 2b, 2c, nimmt  $R_x$  zunächst linear mit der zweiten Position  $x_{12}$  zu, steigt dann sublinear in einer Phase, in welcher die in der Netzinduktivität  $L$  gespeicherte Energie absorbiert werden muss und geht dann in einem Bereich, in dem der Strom  $i$  bereits begrenzt ist und grössere  $R_x$  tolerabel werden, wieder in einen steileren Anstieg  $R_x(x_{12})$  über.

Der Gesamtwiderstand des Strombegrenzers 1 wird im ersten Betriebszustand bei Nominalstrom  $I_1$  durch die Flüssigmetallstrecken 3 determiniert und kann demzufolge durch Bereitstellung eines geeigneten Flüssigmetallquerschnitts auf vorgebbare Werte festgelegt werden. Der maximale Widerstand  $R_x(x_{12})$  des Strombegrenzers 1 kann durch Wahl

des Widerstandsmaterials 5 und durch seine geometrische Gestalt nach Massgabe eines gewünschten Spannungsniveaus und maximal zulässigen Überstroms  $I_2$  dimensioniert werden.

Der Schwellwertstrom  $I_{th}$ , ab dem die Strombegrenzungsvorrichtung 1 aktiviert wird, tritt auf, wenn die elektromagnetische Antriebskraft  $F_{mag}$  die Rückstellkraft  $F_r$  überschreitet. In den Ausführungsbeispielen gemäss Fig. 1a, 1b, 5 und 7 ist die Rückstellkraft  $F_r = F_g + F_{cap}$ . Daraus kann  $I_{th}$  abgeschätzt werden zu

$$I_{th} = [(F_g + F_{cap}) / k]^{1/2} \quad (G6)$$

Im vereinfachten Fall, in dem die Kapillarkräfte  $F_{cap}$  vernachlässigbar sind und das Magnetfeld durch eine Spulengeometrie erzeugt wird, gilt

$$I_{th} = [(A \cdot g \cdot d \cdot \rho) / (\mu \cdot N)]^{1/2} \quad (G7)$$

wobei  $A$ =Querschnittsfläche der Flüssigmetall-Kanäle 3a,  $\rho$ =Massendichte des Flüssigmetalls 3,  $d$ =Länge der magnetfelderzeugenden Spule in der Stromzuführung 2a, 2b, 2c,  $\mu$ =magnetische Permeabilität in der Spule bzw. im Flüssigmetall und  $N$ =Anzahl Windungen der Spule. Die Reaktionszeit  $t_u$  bis zur vollen Strombegrenzung, d. h. bis zum Erreichen der Endposition gemäss Fig. 1b (oder auch Fig. 2 oder Fig. 3), kann durch geeignete Dimensionierung der Magnetfeldmittel 2a, 2b, 2c, 11 und der Rückstellkräfte  $F_g$ ,  $F_{cap}$  auf vorgebbare Werte dimensioniert werden.

Fig. 1b zeigt die Position des Flüssigmetalls 3 im Strombegrenzungsfall. Aufgrund der wirksam werdenden Strombegrenzung nimmt die elektromagnetische Kraft  $F_{mag}$  auf das Flüssigmetall 3 ab und das Flüssigmetall 3 fliesst unter der Wirkung der Gravitationskraft  $F_g$  wieder zurück in die Ausgangsposition zwischen die Elektroden 2a, 2b, 2c. Die Wiedereinschaltzeit  $t_d$  kann unter der Annahme, dass die Kapillarkraft  $F_{cap}$  und die elektromagnetische Kraft  $F_{mag}$  bei begrenztem Strom  $i$  vernachlässigbar sind, abgeschätzt werden zu

$$t_d = [(2 \cdot h) / g]^{1/2} \quad (G8)$$

wobei  $h = x_2 - x_1$ =Höhe der Flüssigmetall-Kanäle 3a.

Die Wiedereinschaltzeit  $t_a$  kann durch eine geeignete Auslegung des Strombegrenzers 1 an die Erfordernisse verschiedener Anwendungsfälle angepasst werden. Insbesondere sind die Kanalhöhe  $h$  und die Kapillarkräfte  $F_{cap}$  beeinflussende Größen wie Kanal-Querschnittsfläche  $A$ , Kanalgeometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Kanäle, sowie die Art des Flüssigmetalls 3 entsprechend zu wählen.

Bei der thermischen Auslegung des Strombegrenzers 1 ist zu beachten, dass wegen der kurzen Reaktionszeiten und auch Wiederanschaltzeiten das Widerstandselement 5 nicht wirksam gekühlt werden kann. Die dissipierte Energie  $E_{loss}$  erhitzt den Strombegrenzer 1. Der Temperaturanstieg  $\Delta T$  beträgt näherungsweise

$$\Delta T = E_{loss} / (A \cdot l \cdot \rho' \cdot c') \quad , \quad (G9)$$

wobei  $A$ =Querschnittsfläche der Flüssigmetallteile (wie zuvor),  $l$ =Gesamtlänge des Strombegrenzers 1 oder des Widerstandselements 5,  $\rho'$ =mittlere Massendichte des Strombegrenzers 1 und  $c'$ =mittlere Wärmekapazität des Strombegrenzers 1. Die Verlustenergie  $E_{loss}$  ist im vorliegenden Fall der resistiven Strombegrenzung viel kleiner als bei Strombegrenzung durch Lichtbogen. Ein wesentlicher Vorteil des verteilten oder matrixartigen Widerstandselements 5 besteht auch darin, dass die Verlustleistung  $E_{loss}$  weitgehend homogen verteilt über das Volumen des Strombegrenzers 1 auftritt und dementsprechend die gesamte thermische Masse oder Wärmekapazität zur Absorption der Verlustenergie  $E_{loss}$  ausgeschöpft werden kann.

Fig. 7 zeigt einen kombinierten Flüssigmetall-Strombegrenzer 1 und Flüssigmetall-Leistungsschalter 1 mit elektromagnetischen Antriebsmittel 2a, 2b, 20; 11;  $B_{int}$ ,  $B_{ext}$  für das Flüssigmetall 3. Das Magnetfeld  $B_{int}$  kann intern durch den zu- oder abführenden Stromleiter 20 und/oder bevorzugt durch eine externe, bezüglich ihrer Magnetfeldrichtung umschaltbare Magnetfeldquelle  $B_{ext}$  erzeugt werden. Bei einer Verschiebung des Flüssigmetalls 3 in positive Bewegungsrichtung  $+x$  wird der Strom  $i$  auf dem



Strombegrenzungspfad 31 geführt und wie oben diskutiert begrenzt. Alternativ kann das Flüssigmetall 3 in einem dritten Betriebszustand entlang der entgegengesetzten Bewegungsrichtung  $-x$  in mindestens eine dritte Position  $x_{13}$ ,  $x_3$  bewegt werden, wobei das Flüssigmetall 3 in der mindestens einen dritten Position  $x_{13}$ ,  $x_3$  in Serie mit einem Isolator 8 liegt und dadurch eine Isolationsstrecke 32 zur Leistungsabschaltung durch die Vorrichtung 1 gebildet wird. Wie dargestellt kann die Isolationsstrecke 8 durch eine Mehrzahl von Isolationsstegen 8a gebildet sein, die im Abschaltfall in alternierender Serieschaltung mit den nach unten verschobenen Flüssigmetallsäulen 3 stehen. Fig. 3 zeigt gestrichelt den analogen Fall für negative Auslenkungen 1 und Positionen  $l_{13}$ ,  $l_3$  eines beweglich aufgehängten Festkörperleiters 3'. Insbesondere wird der dritte Betriebszustand durch einen Abschaltbefehl ausgelöst, durch den ein externes Magnetfeld  $B_{ext}$  zwischen einem Betrieb der Vorrichtung 1 als Strombegrenzer und als Leistungsschalter umgeschaltet wird. Als Flüssigmetall 3 geeignet sind z. B. Quecksilber, Gallium, Cäsium, GaInSn.

Mit Vorteil ist die mindestens eine Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung oberhalb des zweiten Strompfads 31 und/oder unterhalb des ersten Strompfads 30 angeordnet. Dadurch wird eine kompakte Anordnung des Flüssigmetalls 3 und seines Antriebmechanismus 12 relativ zu den zu schaltenden Strömen, insbesondere zum Nennstrompfad 30, Strombegrenzungspfad 31 und gegebenenfalls Stromabschaltungspfad 32, realisiert. Auch kann der Strombegrenzer 1 in Fig. 7 auch als strombegrenzender Schalter 1, wie zuvor beschrieben, ausgelegt sein.

Anwendungen der Vorrichtung 1 betreffen u.a. den Einsatz als Strombegrenzer, strombegrenzender Schalter und/oder Leistungsschalter 1 in Stromversorgungsnetzen, als selbsterholende Sicherung oder als Motorstarter. Die Erfindung umfasst auch eine elektrische Schaltanlage, insbesondere eine Hoch- oder Mittelspannungsschaltanlage, gekennzeichnet durch eine Vorrichtung 1 wie oben beschrieben.



## BEZUGSZEICHENLISTE

1	Flüssigmetall-Strombegrenzer
2a, 2b	Festmetall-Elektroden, Metallplatten, feststehende Elektroden
2c	Zwischenelektroden
2d	mechanischer Schleifkontakt mit wegabhängigem Widerstand
20	Stromzuführung, Stromleiter
3	Flüssigmetall
3a	Kanäle für Flüssigmetall
3b	Einfangbehälter für Flüssigmetall
3c	Zuführung für Flüssigmetall
30	Strompfad für Betriebsstrom, erster Strompfad
31	Strompfad für Strombegrenzung, zweiter Strompfad
32	Stromunterbrechungspfad, Isolationsstrecke
4	Flüssigmetall-Behälter
5	Widerstandselement für Strombegrenzung, Widerstandsmatrix für Flüssigmetall
5a	Einzelwiderstände
6	Behälterdeckel, Gehäusewand, Isolator
7	Schalter, Leistungsschalter
8	Isolator für Stromunterbrechung
8a	Einzelisolatoren
9	flexible Membran
10	Ventil für Flüssigmetallzuführung
11	Magnetfeldsteuerung
124	Gegendruckbehälter, gefangenes Gasvolumen
$\alpha$	Reibungskoeffizient
$B_{\text{ext}}, B_{\text{int}}$	externes, internes Magnetfeld
$F_{\text{mag}}$	magnetische Kraft
$F_r$	Rückstellkraft
$i$	Strom
$I_1$	Betriebsstrom
$I_2$	begrenzter Überstrom
$k$	Proportionalitätskonstante
$l, l_1, l_2, l_{12}, l_3, l_{13}$	Schleifkontaktpositionen

L	Netzinduktivität
$P_1, P_2, P_3$	Gasdruck
$R_x, R_1$	Widerstand des Strombegrenzers
t	Zeitvariable
$U_b$	Lichtbogenzündspannung
$U_N$	Netzspannung, Betriebsspannung
$V_1, V_2, V_3$	Gasvolumen
$x, x_1, x_2, x_{12}, x_3, x_{13}$	Positionen der Flüssigmetallsäule

## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Strombegrenzung (1) mit einer Strombegrenzungsvorrichtung (1), die feststehende Elektroden (2a, 2b) und mindestens eine bewegliche Elektrode (3, 3') umfasst, wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehenden Elektroden (2a, 2b) ein Betriebsstrom ( $I_1$ ) auf einem ersten Strompfad (30) durch die Strombegrenzungsvorrichtung (1) geführt wird und der erste Strompfad (30) zumindest teilweise durch die in einer ersten Position ( $x_1, l_1$ ) befindliche bewegliche Elektrode (3, 3') geführt wird, dadurch gekennzeichnet, dass in einem zweiten Betriebszustand
  - a) die mindestens eine bewegliche Elektrode (3, 3') selbsttätig durch eine elektromagnetische Wechselwirkung mit dem zu begrenzenden Überstrom ( $I_2$ ) entlang einer Bewegungsrichtung ( $x, l$ ) in mindestens eine zweite Position ( $x_{12}, x_2, l_{12}, l_2$ ) bewegt wird und
  - b) die bewegliche Elektrode (3, 3') in der mindestens einen zweiten Position ( $x_{12}, x_2, l_{12}, l_2$ ) in Serie mit einem Widerstandselement (5) liegt und dadurch ein strombegrenzender zweiter Strompfad (31) durch die Strombegrenzungsvorrichtung (1) gebildet wird, der einen vorgebbaren elektrischen Widerstand ( $R_x, R_1$ ) aufweist.
2. Das Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) bei einem Übergang von der ersten Position ( $x_1, l_1$ ) zur zweiten Position ( $x_{12}, x_2, l_{12}, l_2$ ), insbesondere zu einer extremalen zweiten Position ( $x_2, l_2$ ), die bewegliche Elektrode (3, 3') entlang des Widerstandselements (5) geführt wird und
  - b) das Widerstandselement (5) einen entlang der Bewegungsrichtung ( $x, l$ ) der beweglichen Elektrode (3, 3') ansteigenden elektrischen Widerstand ( $R_x, R_1$ ) für den zweiten Strompfad (31) aufweist und

- c) insbesondere dass das Widerstandselement (5) ohmsch ist und der elektrische Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) kontinuierlich mit der zweiten Position ( $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$ ) ansteigt.
3. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) der zweite Betriebszustand durch den Überstrom ( $I_2$ ) selbsttätig aktiviert wird, indem die stromdurchflossene bewegliche Elektrode (3, 3') durch eine elektromagnetische Kraft ( $F_{\text{mag}}$ ) bewegt wird, die senkrecht zum Strom ( $I_2$ ) durch die bewegliche Elektrode (3, 3') und senkrecht zu einem Magnetfeld ( $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$ ) steht und die eine Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) aufweist, wobei
  - b) das Magnetfeld ( $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$ ) als ein externes Magnetfeld ( $B_{\text{ext}}$ ) und/oder als ein internes, von einer Stromzuführung (2a, 2b; 20) zur Strombegrenzungsvorrichtung (1) erzeugtes Magnetfeld ( $B_{\text{int}}$ ) gewählt wird.
4. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) der elektrische Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) bis zu einer extremalen zweiten Position ( $x_2$ ,  $l_2$ ) auf einen Maximalwert ( $R_x(x_2)$ ,  $R_l(l_2)$ ) ansteigt und/oder
  - b) für ein gegebenes Spannungsniveau ein Maximalwert ( $R_x(x_2)$ ,  $R_l(l_2)$ ) des elektrischen Widerstands ( $R_x$ ,  $R_l$ ) nach Massgabe eines zu begrenzenden Stroms ( $I_2$ ) auf einen endlichen Wert oder zur Abschaltung des Stroms ( $I_1$ ,  $I_2$ ) auf einen dielektrischen Isolationswert bemessen wird.
5. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der elektrische Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) als Funktion ( $R_x(x_{12})$ ,  $R_l(l_{12})$ ) der zweiten Position ( $x_{12}$ ,  $l_{12}$ ) sowie eine Weg-Zeit Charakteristik ( $x_{12}(t)$ ,  $l_{12}(t)$ ) der beweglichen Elektrode (3, 3')

entlang der Bewegungsrichtung  $(x, l)$  so gewählt werden, dass

- a) in jeder zweiten Position  $(x_{12}, x_2, l_{12}, l_2)$  der beweglichen Elektrode  $(3, 3')$  das Produkt aus elektrischem Widerstand  $(R_x, R_l)$  und Strom  $(I_2)$  kleiner als eine Lichtbogenzündspannung  $(U_b)$  zwischen der beweglichen Elektrode  $(3, 3')$  und den feststehenden Elektroden  $(2a, 2b)$  und gegebenenfalls Zwischen Elektroden  $(2c)$  ist und/oder
- b) eine hinreichende Steilheit der Strombegrenzung zur Beherrschung netzbedingter Kurzschlussströme  $(i(t))$  erzielt wird.

6. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in einem dritten Betriebszustand

- a) die bewegliche Elektrode  $(3, 3')$  entlang einer entgegengesetzten Bewegungsrichtung  $(-x, -l)$  in mindestens eine dritte Position  $(x_{13}, x_3, l_{13}, l_3)$  bewegt wird und
- b) die bewegliche Elektrode  $(3, 3')$  in der mindestens einen dritten Position  $(x_{13}, x_3, l_{13}, l_3)$  in Serie mit einem Isolator  $(8)$  liegt und dadurch eine Isolationsstrecke  $(32)$  zur Leistungsabschaltung durch die Vorrichtung  $(1)$  gebildet wird und
- c) insbesondere dass der dritte Betriebszustand durch einen Abschaltbefehl ausgelöst wird, durch den ein externes Magnetfeld  $(B_{ext})$  zwischen einem Betrieb der Vorrichtung  $(1)$  als Strombegrenzer und als Leistungsschalter umgeschaltet wird.

7. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

- a) die bewegliche Elektrode  $(3, 3')$  ein Flüssigmetall  $(3)$  umfasst, das in mindestens einem Kanal  $(3a)$  der Strombegrenzungsvorrichtung  $(1)$  angeordnet wird und entlang einer Höhenerstreckung des Kanals  $(3a)$  zwischen dem ersten Strompfad  $(30)$  für den Betriebs-



- strom ( $I_1$ ) und dem zweiten Strompfad (31) zur Strombegrenzung bewegt werden kann und
- b) insbesondere dass mehrere Kanäle (3a) durch wandartige Stege (5a) voneinander getrennt sind, die im Bereich des ersten Strompfads (30) Zwischenelektroden (2c) zum Durchleiten des Betriebsstroms ( $I_1$ ) aufweisen und im Bereich des zweiten Strompfads (31) Einzelwiderstände (5a) des Widerstandselements (5) aufweisen.
8. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) die bewegliche Elektrode (3, 3') einen Festkörperleiter (3') mit mindestens einem Schleifkontakt (2d) umfasst und im ersten Betriebszustand mit den feststehenden Elektroden (2a, 2b) und im zweiten Betriebszustand mindestens einseitig mit dem Widerstandselement (5) elektrisch verbunden wird und
- b) insbesondere dass der Festkörperleiter (3') im wesentlichen aus Leichtmetall und/oder in Leichtbauweise gefertigt ist und/oder der Schleifkontakt (2d) zur Reibungsverminderung mit Flüssigmetall benetzt wird.
9. Vorrichtung zur Strombegrenzung (1), insbesondere zur Ausführung des Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, umfassend feststehende Elektroden (2a, 2b) und mindestens eine bewegliche Elektrode (3, 3'), wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehenden Elektroden (2a, 2b) ein erster Strompfad (30) für einen Betriebsstrom ( $I_1$ ) durch die Strombegrenzungsvorrichtung (1) vorhanden ist und der erste Strompfad (30) zumindest teilweise durch die in einer ersten Position ( $x_1, l_1$ ) befindliche bewegliche Elektrode (3, 3') führt, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) elektromagnetische Antriebsmittel (2a, 2b, 20; 11;  $B_{int}$ ,  $B_{ext}$ ) zum bei Überstrom ( $I_2$ ) selbstbetätigten Bewegen der beweglichen Elektrode (3, 3') entlang

- einer Bewegungsrichtung  $(x, l)$  in mindestens eine zweite Position  $(x_{12}, x_2, l_{12}, l_2)$  vorhanden sind,
- b) elektrische Widerstandsmittel (5) mit einem vorgebaren elektrischen Widerstand  $(R_x)$  vorhanden sind und
- c) in einem zweiten Betriebszustand die bewegliche Elektrode  $(3, 3')$  zumindest teilweise in Serie zu den Widerstandsmitteln (5) liegt und zusammen mit diesen einen zweiten Strompfad (31) bildet, auf dem der Betriebsstrom  $(I_1)$  auf einen zu begrenzenden Strom  $(I_2)$  begrenzbar ist.
10. Die Vorrichtung (1) nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die elektromagnetischen Antriebsmittel  $(2a, 2b, 20; 11; B_{int}, B_{ext})$  Magnetfeldmittel  $(2a, 2b, 20; 11)$  zur Erzeugung eines Magnetfeldes  $(B_{ext}, B_{int})$  umfassen, welches auf die von dem Strom  $(I_1, I_2)$  durchflossene bewegliche Elektrode  $(3, 3')$  eine Lorenzkraft  $(F_{mag})$  mit einer Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung  $(x, l)$  ausübt, so dass die bewegliche Elektrode  $(3, 3')$  zwischen dem ersten Strompfad (30) für Betriebsstrom  $(I_1)$ , dem zweiten Strompfad (31) zur Strombegrenzung und insbesondere einer Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung bewegbar ist.
11. Die Vorrichtung (1) nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) die Magnetfeldmittel  $(2a, 2b, 20; 11)$  eine Stromzuführung  $(2a, 2b; 20)$  zur Strombegrenzungsvorrichtung (1) umfassen, um ein internes, vom zu begrenzenden Überstrom  $(I_2)$  abhängiges Magnetfeld  $(B_{int})$  zu erzeugen und/oder
- b) die Magnetfeldmittel  $(2a, 2b, 20; 11)$  Mittel (11) zur Erzeugung eines externen, konstanten oder regelbaren Magnetfeldes  $(B_{ext})$  umfassen und/oder
- c) das Magnetfeld  $(B_{ext}, B_{int})$  nach Massgabe eines zu begrenzenden Überstroms  $(I_2)$  und einer hierfür erforderlichen Weg-Zeit Charakteristik  $(x(t), l(t))$

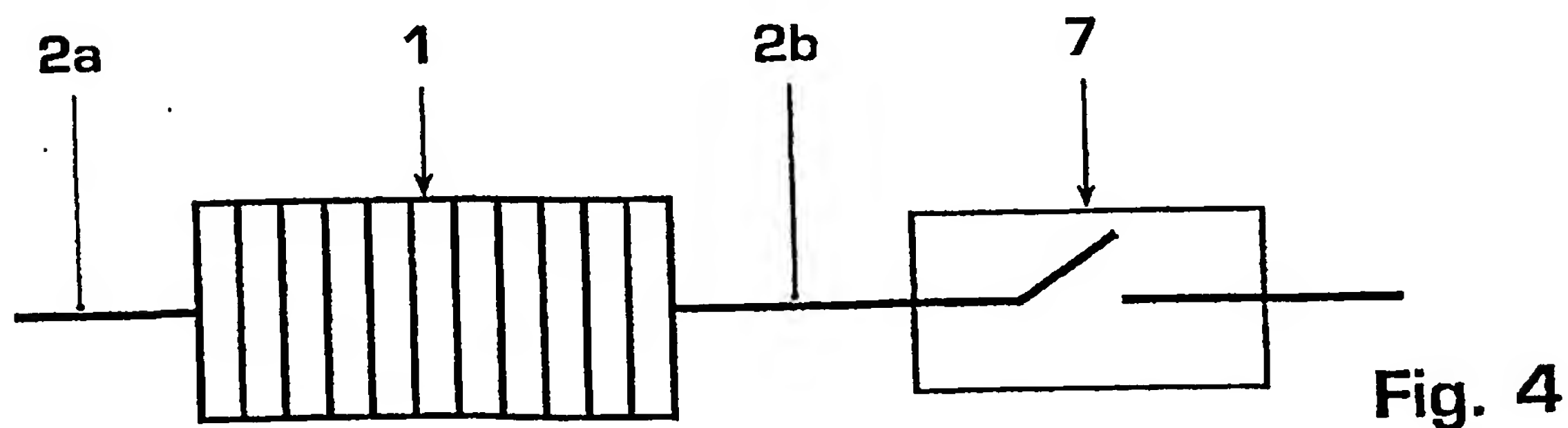
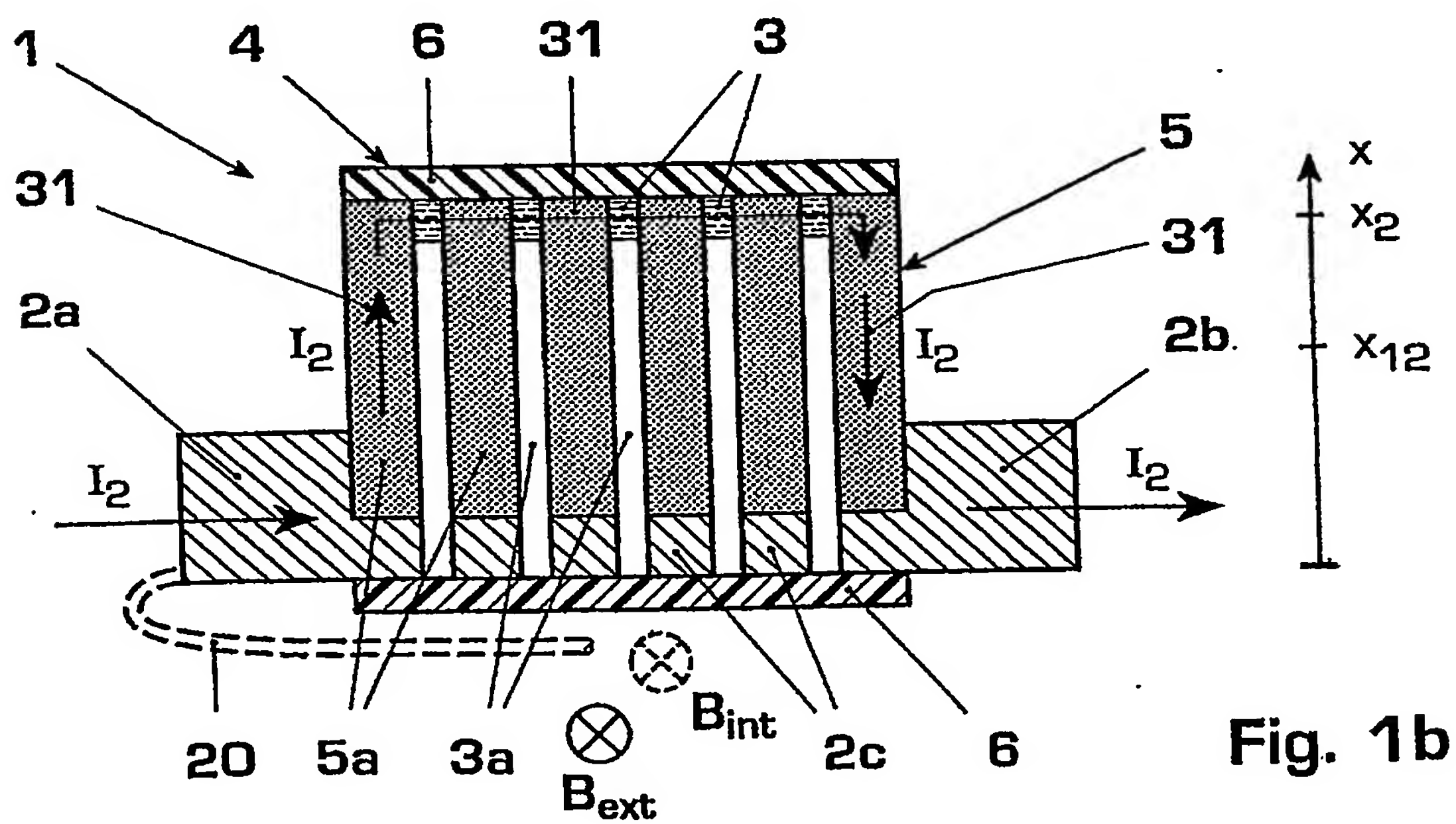
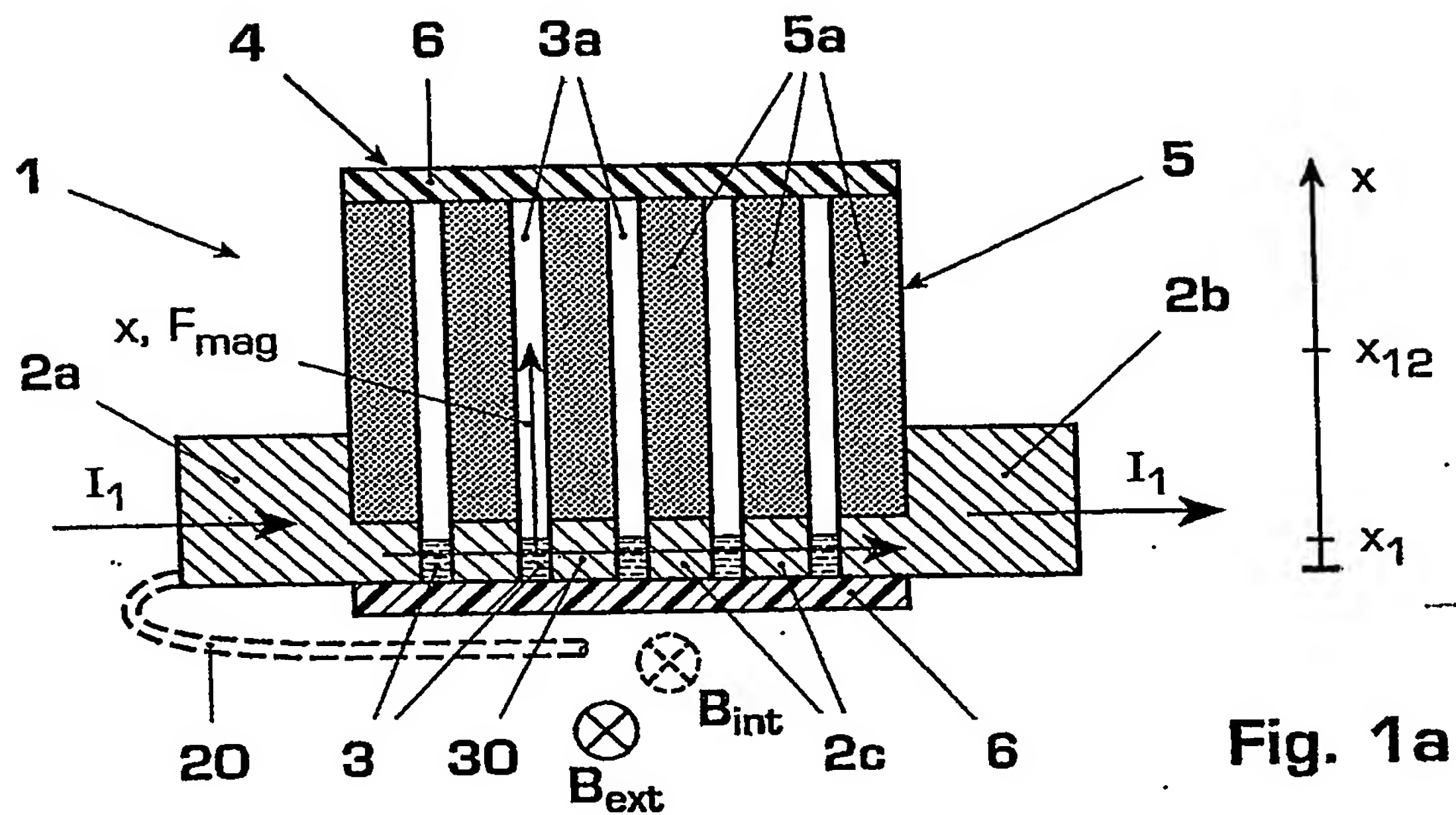
der beweglichen Elektrode (3, 3') im zweiten Strompfad (31) ausgelegt ist.

12. Die Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 9-11, dadurch gekennzeichnet, dass die Widerstandsmittel (5) zur lichtbogenfreien Strombegrenzung einen entlang der Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) bis zu einer extremalen zweiten Position ( $x_2$ ,  $l_2$ ) kontinuierlich zunehmenden elektrischen Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) für den zweiten Strompfad (31) aufweisen.
13. Die Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 9-12, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) die bewegliche Elektrode (3, 3') ein Flüssigmetall (3) umfasst, das durch die Magnetfeldmittel (2a, 2b, 20; 11) im flüssigen Aggregatzustand bewegt wird und/oder
  - b) die bewegliche Elektrode (3, 3') einen Festkörperleiter (3') mit mindestens einem Schleifkontakt (2d) umfasst, wobei der Festkörperleiter (3') durch die Magnetfeldmittel (2a, 2b, 20; 11) gegen eine Rückstellkraft ( $F_r$ ), insbesondere gegen die Schwerkraft, einseitig oder beidseitig angehoben wird.
14. Die Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 9-13, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) der erste Strompfad (30 für Betriebsstrom ( $I_1$ ), der zweite Strompfad (31) zur Strombegrenzung und insbesondere eine Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung im wesentlichen senkrecht zur Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) und/oder im wesentlichen parallel zueinander angeordnet sind und/oder
  - b) mindestens eine Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung oberhalb des zweiten Strompfads (31) und/oder unterhalb des ersten Strompfads (30) angeordnet ist.
15. Elektrische Schaltanlage, insbesondere Hoch- oder Mittelspannungsschaltanlage, gekennzeichnet durch eine Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 9-14.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung (1) zur Strombegrenzung sowie eine Schaltanlage mit einer solchen Vorrichtung (1). Erfindungsgemäss wird eine bewegliche Elektrode (3, 3') durch eine überstromabhängige elektromagnetische Kraft ( $F_{\text{mag}}$ ) selbsttätig entlang eines Widerstandselements (5) für den Strombegrenzungspfad (31) geführt, um eine lichtbogenfreie Strombegrenzung zu erzielen. Ausführungsbeispiele sind u.a.: Verwendung der Lorenzkraft zur selbsttätigen Strombegrenzung; Flüssigmetall (3) oder beweglicher Festkörperleiter (3'); ein in der Bewegungsrichtung (x) zunehmender elektrischer Widerstand ( $R_x$ ) für eine sanfte Strombegrenzungsscharakteristik; ein Widerstandselement (5) in Form einer dielektrischen Matrix (5) mit mehreren Kanälen (3a) für das Flüssigmetall (3); und ein kombinierter Strombegrenzer-Leistungsschalter (1). Vorteile sind u. a.: lichtbogenfreie, reversible Strombegrenzung und gegebenenfalls Stromabschaltung, geeignet auch für hohe Spannungen und Ströme, schnelle Reaktionszeiten, geringer Verschleiss und wartungsfreundlich.

(Fig. 1a, 1b)





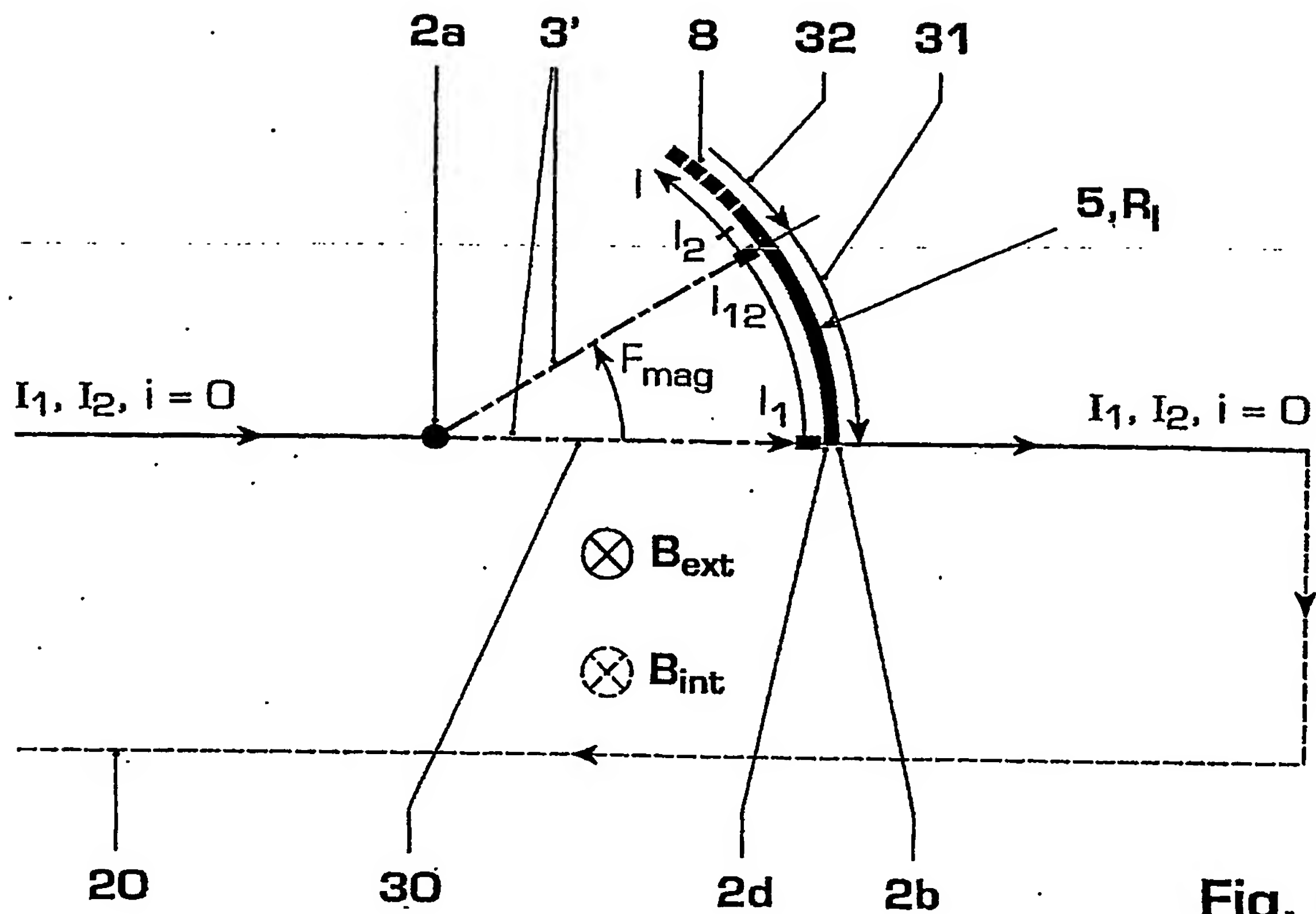


Fig. 2

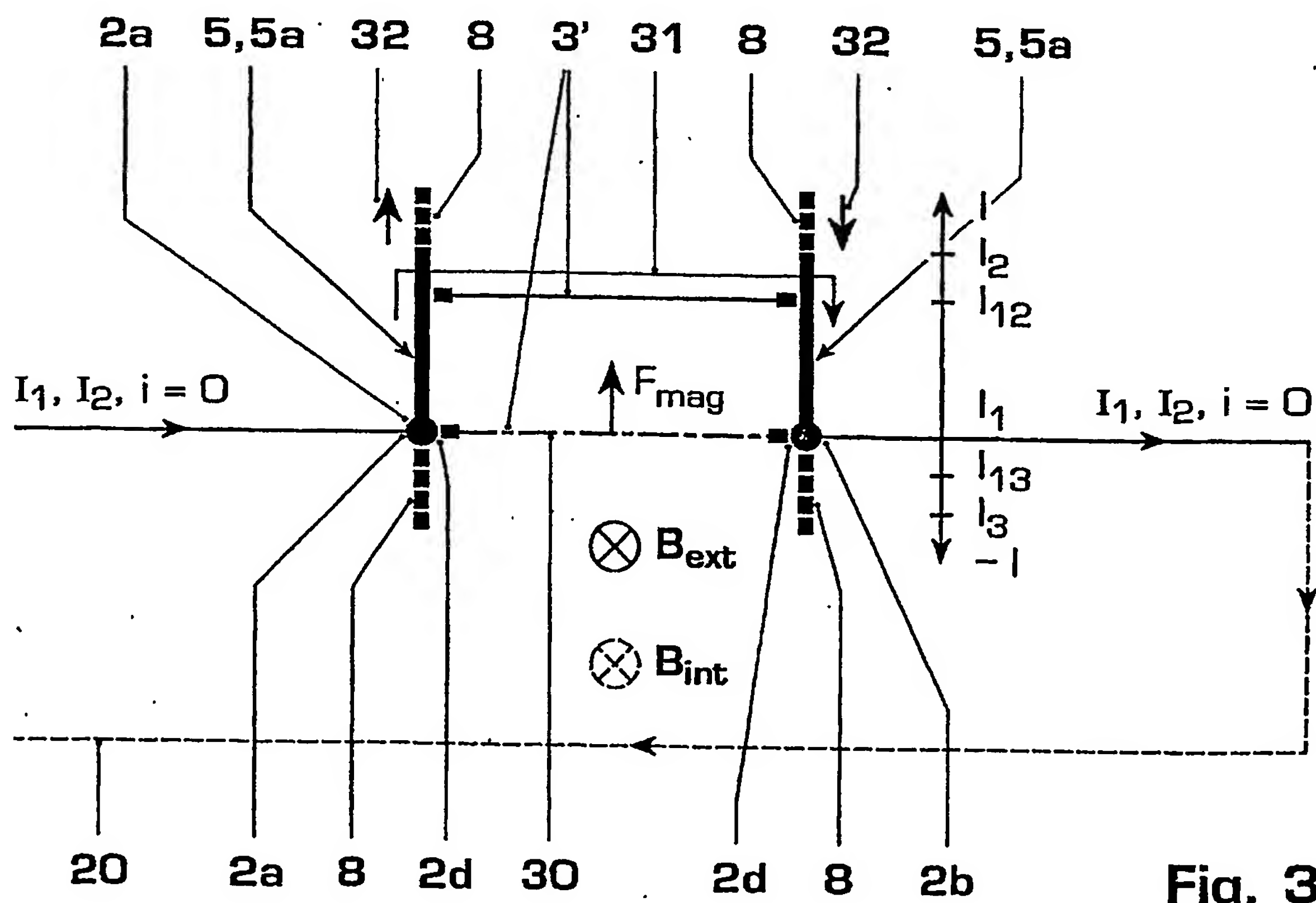


Fig. 3

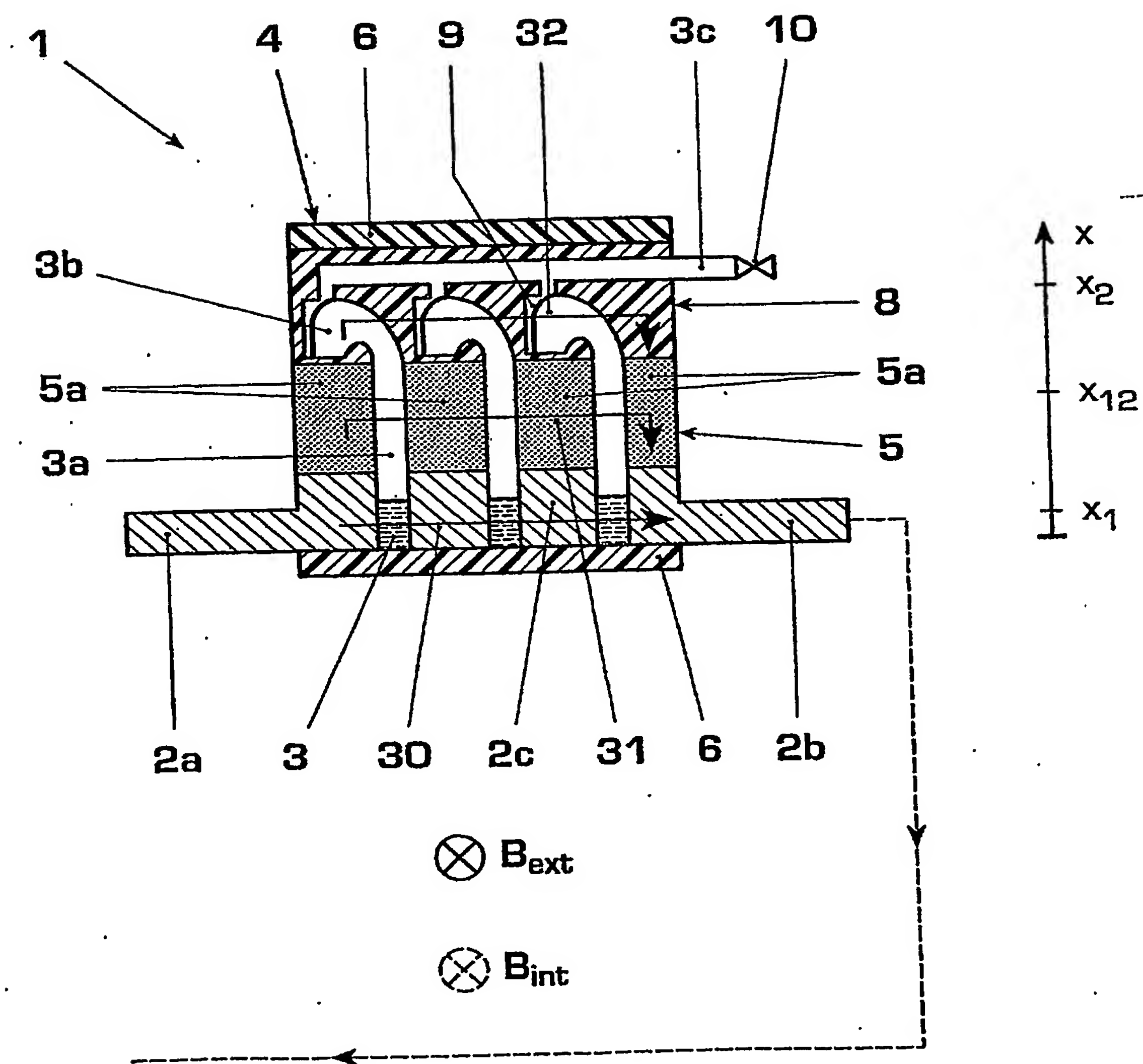


Fig. 5

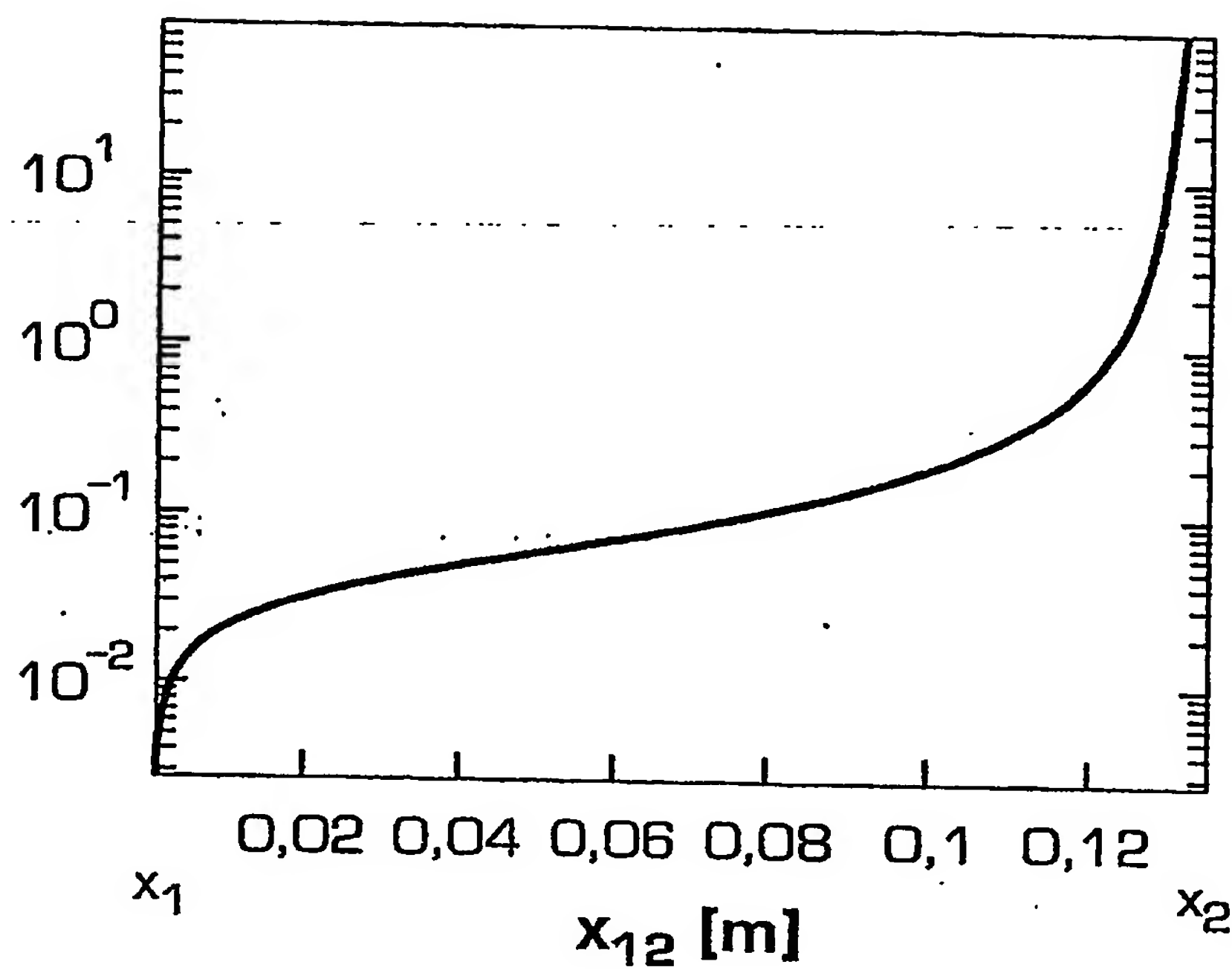
$R [\Omega]$ 

Fig. 6

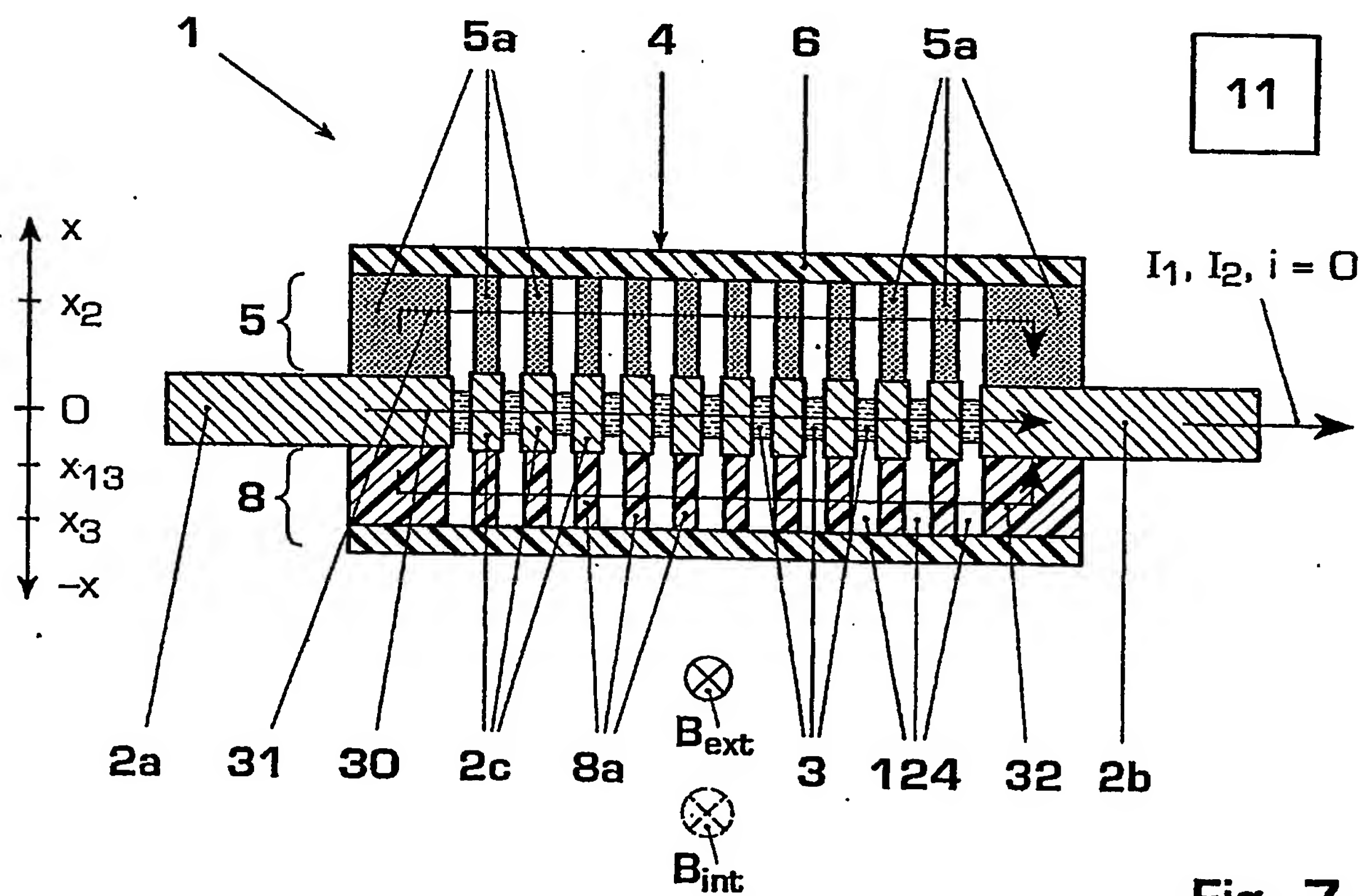


Fig. 7